

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт
з дисципліни «Термодинаміка теплових двигунів»
(Частина 2)

для студентів спеціальності 142 Енергетичне машинобудування

Харків 2019

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт
з дисципліни «Термодинаміка теплових двигунів»
(Частина 2)

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 17.05.2019р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2019

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни «Термодинаміка теплових двигунів» (Частина 2) для студентів спеціальності 142 Енергетичне машинобудування. / уклад. Лінков О.Ю., Кравченко С.С. – Харків, НТУ «ХПІ», 2019. – 28 с.

Укладачі: О.Ю. Лінков,
С.С. Кравченко

Рецензент О.О. Осетров

Кафедра двигунів внутрішнього згоряння

ВСТУП

Дисципліна «Термодинаміка теплових двигунів» є базовою для студентів спеціальності ДВЗ. Вона закріплює та доповнює відомості з термодинаміки і показує, як застосовуються на практиці теоретичні знання.

Необхідність в глибоких знаннях з дисципліни, в практичному використанні цих знань при вивченні базових дисциплін в системі підготовки фахівців-двигунобудівників обумовлює необхідність в проведенні за основними розділами дисципліни лабораторних занять, модульного контролю знань по цим розділам.

Вивчення дисципліни переслідує перш за все мету засвоєння студентами теоретичної бази, необхідної для наступного вивчення дисциплін «Теорія робочих процесів в ДВЗ», «Газова динаміка та агрегати наддуву», практичне використання теоретичних положень дисципліни для аналітичного аналізу та представлення реальних процесів в надпоршневому об'ємі ДВЗ, в агрегатах наддуву ДВЗ.

Методичні вказівки містять лабораторні роботи з вимірювання витрати газу та визначення параметрів потоку газу при дроселюванні.

Лабораторна робота 3

Вимірювання витрати газу

Мета роботи – вивчити устрій та принцип дії приладів для вимірювання витрати газу, провести вимірювання масової витрати повітря двигуном внутрішнього згоряння за допомогою сопла.

1. Основні положення

Для підтримки стехіометричного співвідношення компонентів паливно-повітряної суміші потрібно точна інформація про кількість повітря, що всмоктується в двигун. Цю інформацію надає витратомір повітря.

Екологічні вимоги до сучасних двигунів внутрішнього згоряння вимагають підтримку певного (стехіометричного – для бензинових двигунів) співвідношення повітря і палива паливно-повітряної суміші на всіх режимах роботи. Тільки в цьому випадку витрата палива буде оптимальною, а каталітичний нейтралізатор буде повністю видаляти шкідливі речовини у відпрацьованих газах.

Витрата – кількість речовини, що проходить через заданий перетин трубопроводу чи пристрій за одиницю часу. Розрізняють об'ємну (Q , м³/с) і масову (G , кг/с) витрату.

$$G = \rho \cdot Q,$$

де ρ – густина речовини в місті вимірювання, кг/м³.

Об'ємну витрату можна обчислити якщо відома середня швидкість потоку \bar{W}_0 у перетині трубопроводу та площа поперечного перетину $F_{\text{ТР}}$,

$$Q = F_{\text{ТР}} \cdot \bar{W}_0.$$

Витратоміри за конструкцією розрізняють на:

- обтікання (поплавкові, роторні);
- мембранні (клапанні).
- турбінні;
- ультразвукові;
- теплові.

Для визначення витрати повітря у автомобільних двигунах використовують два способи: механічний, тепловий.

Механічний спосіб заснований на вимірюванні об'єму повітря пропорційного переміщенню заслінки (витратоміри обтікання).

Тепловий спосіб передбачає вимірювання маси повітря відповідно до зміни температури чутливого елемента.

Отже, для визначення витрати газу використовують різні методи, а відповідно і прилади.

2. Прилади для вимірювання витрати газу

2.1. Витратоміри обтікання

Витратомірами обтікання (рис. 1) називаються прилади, чутливий елемент яких сприймає динамічний тиск потоку і переміщається під його впливом, причому величина переміщення залежить від витрати.

Всі витратоміри обтікання можна розділити на три групи:

- витратоміри постійного перепаду тиску;
- витратоміри із змінним перепадом тиску;
- витратоміри з поворотною лопаткою.

Особливості першої групи витратомірів: тіло (поплавок) переміщається вертикально, а сила опору потоку виникає за рахунок ваги рухомого тіла.

У другій групі сила протидії створюється пружиною, а обтікаюче тіло може переміщатися в різних площинах.

У витратомірах з поворотною лопаткою сила протидії створюється вагою тіла і пружиною, а іноді додатковим джерелом енергії.

В якості тіла обтікання в таких витратомірах може застосовуватися: поплавок, поршень, диск, лопатка. Обтічне тіло може рухатися по прямій (зазвичай вздовж своєї вертикальної осі) або повертатися навколо осі підвісу.

У всіх витратомірах між рухомим тілом і стінками труби залишається прохідний перетин. Тому потрібно враховувати, що на тіло буде діяти не тільки тиск потоку, але і сила в'язкого тертя, яка залежить від в'язкості речовини і форми тіла.

Переваги витратомірів обтікання: висока надійність, великий діапазон вимірювань, відносно невелика похибка, простота конструкції, простота в експлуатації.

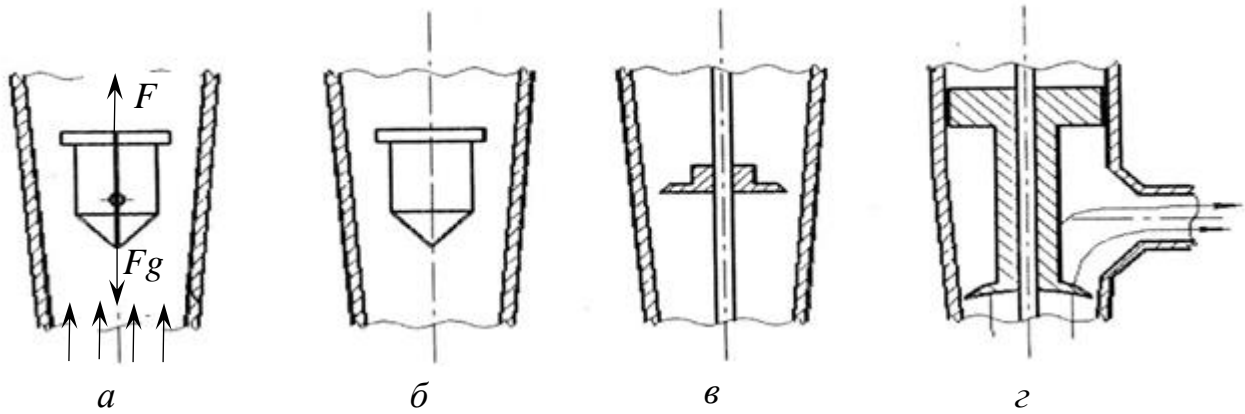


Рисунок 1 – Принцип дії (а) і форми (б – г) поплавкових витратомірів

В автомобілях широке поширення отримали механічні витратоміри обтікання. Механічний витратомір повітря (обтікання) (рис. 2) використовувався в системах безпосереднього впорскування Jetronic, а також об'єднаних системах впорскування і запалювання. В системі К-Jetronic витратомір повітря забезпечує кількісне регулювання паливно-повітряної суміші і являє собою напірний диск, механічно з'єднаний з плунжером дозатора-розподільника.

В системі KE-Jetronic в механічну схему витратоміра повітря включено елемент електронного керування - потенціометр. Більш досконалий механічний витратомір встановлювався в системі L-Jetronic.

За конструкцією механічний витратомір включає:

- вимірювальну заслінку;
- корпус з демпфуючою камерою;
- демпфуючу заслінку;
- потенціометр;

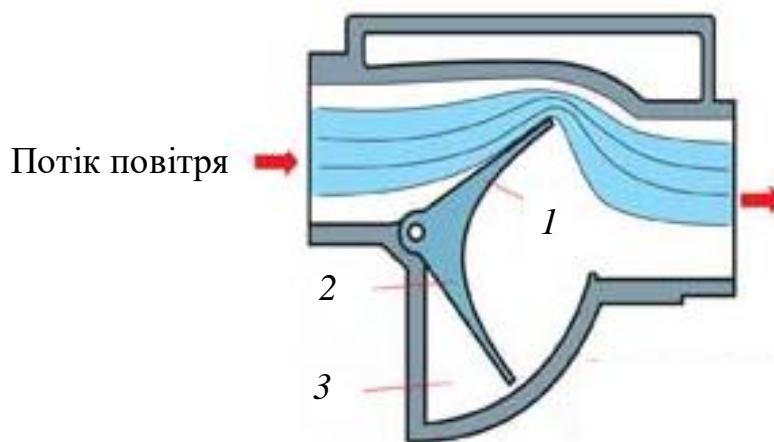


Рисунок 2 – Схема механічного витратоміра повітря
1 – вимірювальна заслінка; 2 – демпфуюча заслінка; 3 – демпфуюча камера

Принцип роботи витратоміра повітря базується на переміщенні заслінки пропорційно величині потоку повітря. Вимірювальна заслінка, демпфуюча заслінка і потенціометр розміщені на одній осі, що забезпечує прямий зв'язок між переміщенням заслінки і зміною опору потенціометра.

За конструкцією потенціометр виконаний у вигляді керамічної підкладки, на яку нанесені резисторні доріжки. До доріжок притиснутий повзунок потенціометра. На потенціометр подається напруга, що змінюється відповідно до опору. Зміна напруги враховується електронним блоком керування як об'ємна характеристика повітря на вході до двигуна. Для коригування показань витратоміра в систему керування включений датчик температури вхідного повітря.

На сьогодні механічні витратоміри на двигунах внутрішнього згоряння не встановлюються.

Турбінні лічильники газу – це лічильники швидкісного типу, потік газу, що проходить, приводить в обертання крильчатку турбіни лічильника, обертання турбіни передається на рахунковий механізм (рис. 3). До переваг лічильника такого типу можна віднести вартість, а також менш жорсткі вимоги до фільтруючих елементів, що встановлюються перед лічильниками.

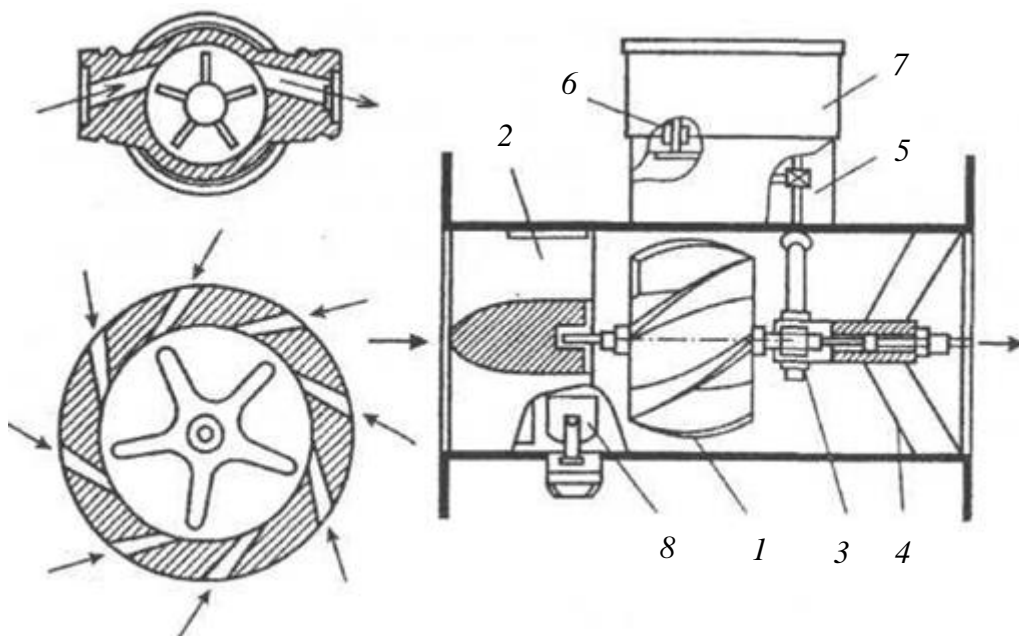


Рисунок 3 – Лічильники турбінного типу

Основні недоліки – вузький динамічний діапазон (до 1:30), інерційність, також існує необхідність в установці прямих ділянок перед лічильником.

Ультразвукові лічильники газу – це електронні лічильники (рис. 4). Принцип роботи заснований на ультразвуковому вимірюванні швидкості потоку газу, що проходить через лічильник з наступним множенням на площу перетину отвору лічильника і час. Шляхом обчислень знаходиться об'єм, який пройшов через лічильник газу, з подальшим відображенням на електронному рідкокристалічному табло.

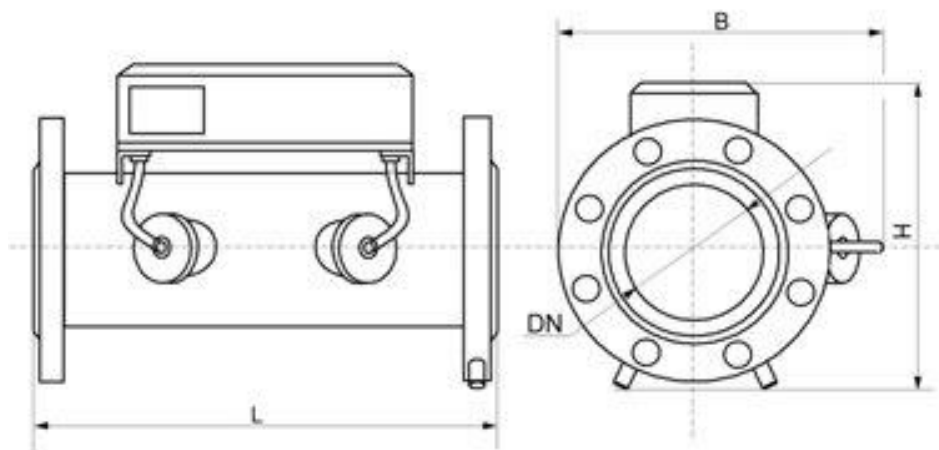


Рисунок 4 – Ультразвуковий лічильник

Переваги: широкий динамічний діапазон (1:250), відсутні жорсткі вимоги до чистоти газу.

Недоліки: необхідність в установці прямих ділянок до і після лічильника, потребує періодичної заміни елемента живлення.

Більш досконалими є витратоміри повітря, побудовані на тепловому способі визначення масової витрати повітря (так звані термоанемометричні витратоміри повітря, від «анемія» – вітер). Вони не мають рухомих механічних частин, характеризуються високою швидкодією, точністю і в силу особливості конструкції не залежать від температури повітря.

Термоанемометрический витратомір повітря (інше найменування - датчик масової витрати повітря, ДМВП) використовується в сучасних системах впорскування бензинових і дизельних двигунів, в тому числі в системі безпосереднього впорскування палива (рис. 5). У деяких системах керування двигуном витратомір повітря не використовується, а його функції виконує датчик тиску повітря у впускному трубопроводі.

Залежно від конструкції чутливого елемента розрізняють наступні види термоанемометричних витратомірів:

- дротяний витратомір повітря (Hot Wire MAF Sensor);
- плівковий витратомір повітря (Hot Film Air Flow Sensor, HFM).

Основою дротяного термоанемометричного витратоміра повітря є чутливий елемент – платинова нагрівальна нитка (рис. 5). Робота витратоміра побудована на підтримці постійної температури платинової нитки за рахунок нагріву електричним струмом.

При русі потоку повітря через датчик чутливий елемент охолоджується. Терморезистор збільшує струм нагріву нитки. Перетворювач напруги перетворює зміну струму нагріву чутливого елемента в вихідну напругу. Між вихідною напругою і масовою витратою повітря існує нелінійна залежність, яка враховується блоком керування двигуном.

Для запобігання забруднення чутливого елемента в роботі дротяного витратоміра передбачений режим самоочищення, при якому на непрацюючому двигуні платинова нитка короткочасно нагрівається до температури 1000 °С.

Необхідно відзначити, що в ході експлуатації витратоміра товщина платинової нитки зменшується, що призводить до зниження точності вимірювань.

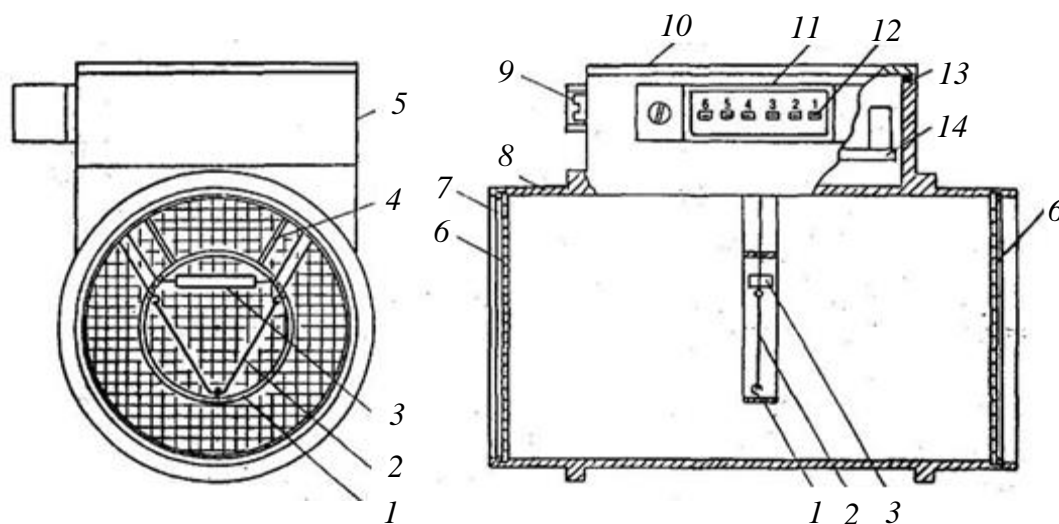


Рисунок 5 – Датчик масової витрати повітря:

- 1 – кільце; 2 – платинова нитка; 3 – термокомпенсаційний опір;
4 – кронштейн кріплення кільця; 5 – корпус електронного модуля;
6 – запобіжна сітка; 7 – стопорне кільце; 8 – корпус датчика;
9 – гвинт регулювання СО; 10 – кришка; 11 – роз'єм; 12 – штекер;
13 – ущільнювач; 14 – електронний модуль

Даного недоліку позбавлений плівковий витратомір повітря (рис. 6), який прийшов на зміну дротяного датчика. Принцип дії плівкового витратоміра аналогічний дротовому ДМВП. Основна відмінність полягає в конструкції чутливого елемента.

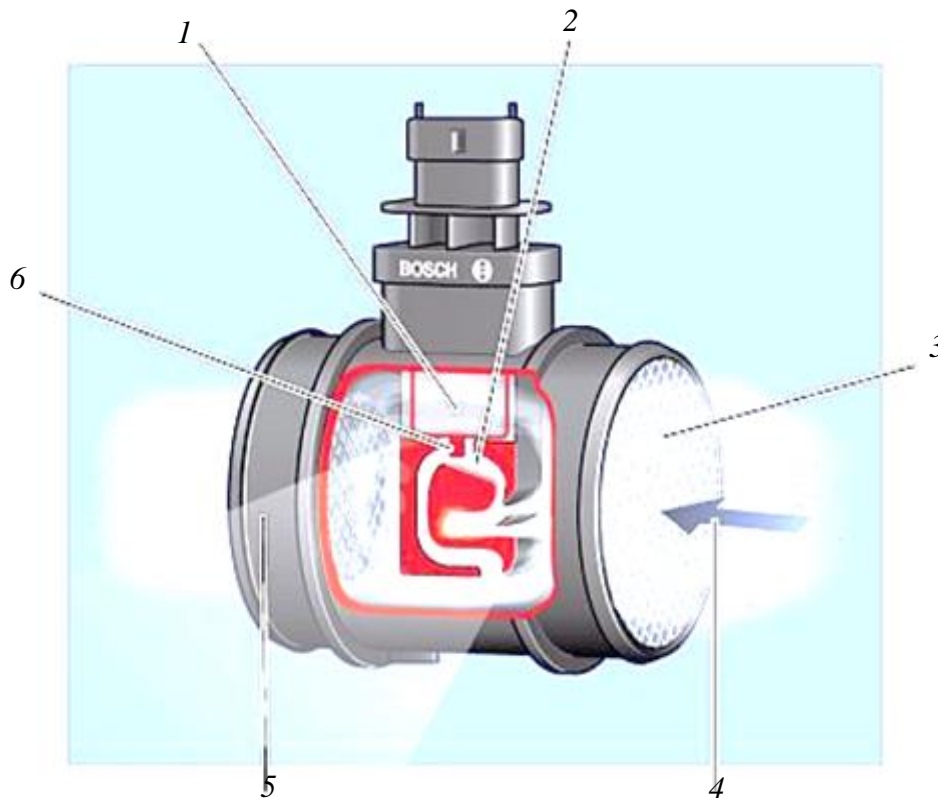


Рисунок 6 – Термоанемометричний плівковий витратомір повітря HFM 6:

- 1 – електронний блок; 2 – частина потоку; 3 – захисна решітка;
4 – усмоктуване повітря; 5 – вимірювальна трубка;
6 – чутливий елемент

Сигналом ДМВП є постійний струм певної напруги, величина якого залежить від кількості та напрямку руху повітря, що проходить через датчик. При прямому потоці повітря напруга вихідного сигналу датчика змінюється в діапазоні 1-5 В. При зворотному потоці повітря напруга змінюється в діапазоні 0-1 В.

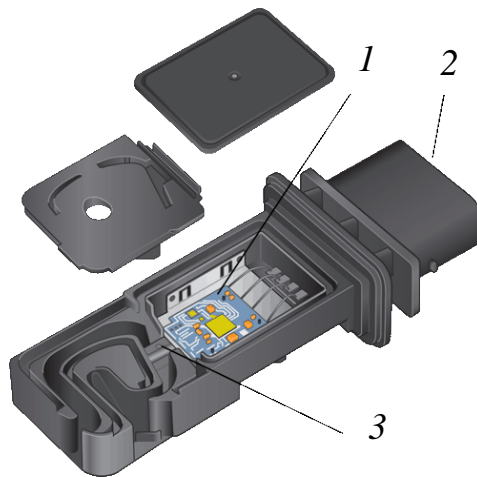


Рисунок 7 – Конструкція чутливого елемента:

- 1 – електронний блок, який здійснює обробку цифрового сигналу;
- 2 – роз'єм; 3 – мікромеханічний чутливий елемент з функцією розпізнавання зворотного потоку і датчиком температури всмоктуваного повітря

Вимірювальний резистор (опір якого пропорційний витраті повітря) знаходиться в безпосередньому тепловому контакті, як з нагрівачем, так і з повітряним потоком, що поступає, і включений в вимірювальний міст. Завдяки розділенню вимірювача і нагрівача забезпечується більша точність вимірювання. Напруга на вимірювальному резисторі, що нагрівається є мірою для маси повітряного потоку. Далі ця напруга перетворюється (посилується) електронною схемою, щоб контролер міг визначити його величину, тобто відбувається узгодження рівнів.

2.2. Дросельні пристрої

Сутність методу вимірювання витрати за допомогою дросельного пристрою полягає у використанні місцевого звуження в трубі, по якій протікає газ, і вимірюванні перепаду тиску в перетинах труби до звуження та у самому вузькому перетині потоку.

Звуження в трубах для вимірювання витрати газу за конструкцією виконують у вигляді нормальної діафрагми (рис. 8) або нормального сопла (рис. 9). Вимірювання перепаду тиску виконується за допомогою диференційних манометрів.

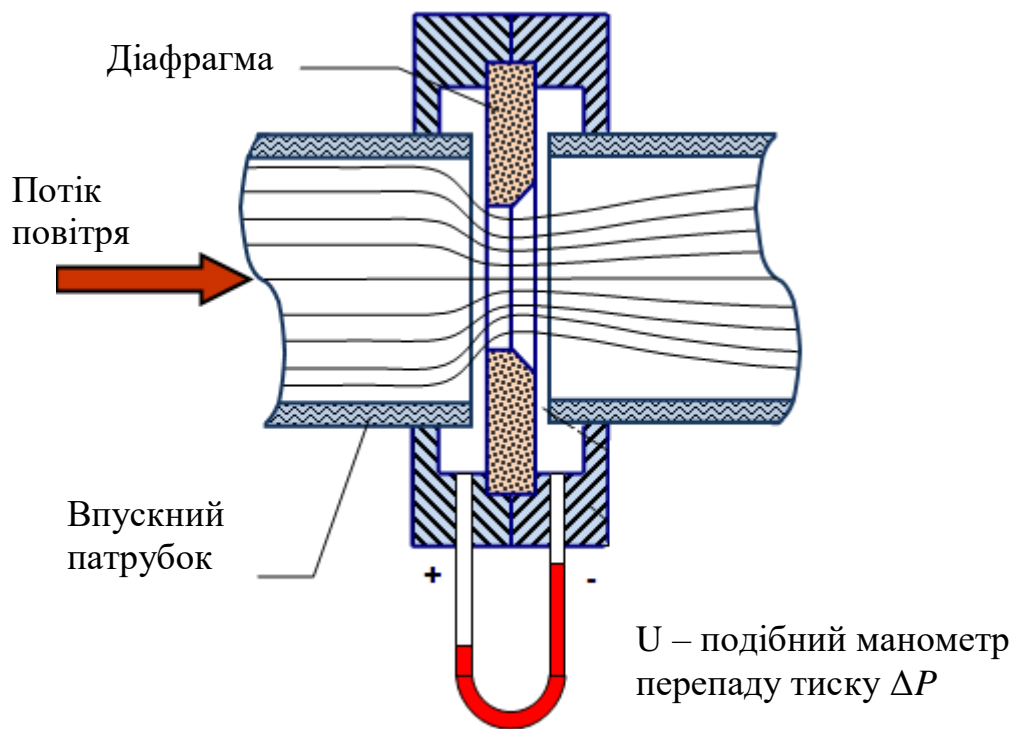


Рисунок 8 –Зміна тиску вздовж труби при встановленні дросельного пристрою (діафрагми)

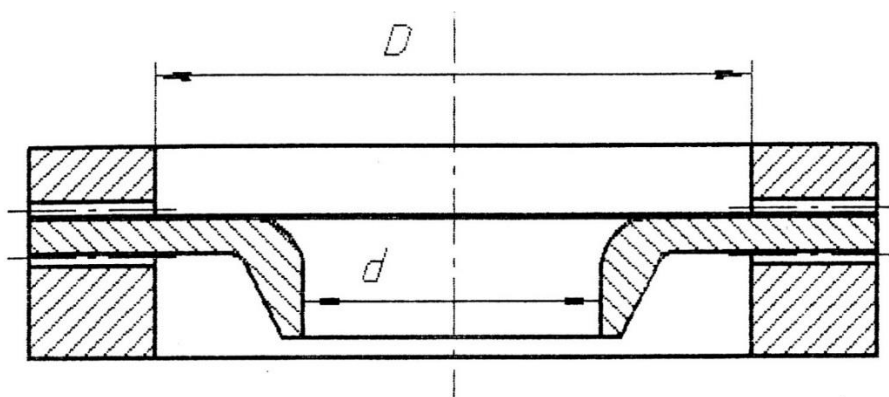


Рисунок 9 – Нормальне сопло

На рис. 8 показана форма потоку в дросельному пристрої в круглому трубопроводі і закон розподілу тиску вздовж осі труби в характерних точках. Перед перешкодою потік звужується до розмірів перетину дросельного пристрою, швидкість потоку зростає. Під дією сил інерції потік продовжує звужуватись далі і досягає мінімального перетину на деякій відстані від встановленого пристрою. Після цього потік поступово розширюється до розмірів поперечного перетину труби, швидкість потоку зменшується.

Між середньою швидкістю за нормальним перетином потоку і різницею тисків в перетинах до звуження P_1 і у самому вузькому

перетині потоку P_2 існує стале співвідношення, яке покладено в основу рівняння витрати для звужуючих пристроїв, кг/с:

$$G = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \cdot \rho_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_1^{-1} (P_1 - P_2)},$$

де α – коефіцієнт витрати;

ε – коефіцієнт розширення;

F_0 – площа перетину отвору діафрагми або сопла, м²;

P_1, P_2 – тиск газу в характерних точках потоку, Па;

ρ_1 – густина газу до звужуючого пристрою.

Перепад тиску $P_1 - P_2$, слід розуміти як різницю тисків в таких точках потоку, де швидкість дорівнює середньому значенню по всьому потоку. Однак, положення таких точок, рівно як і положення найбільш вузького перетину в потоці, невідоме. Тому тиски P_1 та P_2 виміряють у стінки трубопроводу поблизу дросельного пристрою (рис. 8), а похибка враховується коефіцієнтом витрати α .

Коефіцієнт витрати α визначається експериментальним шляхом і наводиться у вигляді графіків залежності числа Рейнольдса Re і відношення діаметрів діафрагми або сопла d до діаметра трубопроводу D (дивись додаток). При обранні розмірів дросельного пристрою походять з умови, що в усьому діапазоні зміни витрати число Re повинно знаходитись праворуч від межі сталості α .

Визначення критерія подібності Re для заданої витрати і діаметру трубопроводу відбувається за формулою:

$$Re = 354 \cdot 10^4 \frac{G}{D \cdot \eta},$$

де G – витрата повітря, кг/с;

D – діаметр трубопроводу, мм;

η – коефіцієнт динамічної густини газу, мкпз (мікропузи).

Коефіцієнт розширення ε також визначається експериментально в залежності від відношення тисків $h/P_1 = \frac{P'_1 - P'_2}{P_1}$ для різних значень відносного звуження перетину m :

$$m = \frac{F_0}{F_1},$$

де F_0 і F_1 – відповідно, площа перетину звужуючого пристрою і труби.

Експериментальні значення ε подають у вигляді графіків (для нормальних сопел приведені у додатку).

2.3. Об'ємні лічильники

Принцип дії об'ємних лічильників полягає у тому, що газ заповнює визначений об'єм та під дією напору приводить у рух диск або поршень, який пов'язаний з рахунковим механізмом. Висока точність вимірювань забезпечується при урахуванні дійсних параметрів стану газу (тиск, температура).

Ротаційний лічильник.

Основними елементами ротаційного лічильника (рис. 10) є встановлені на підшипниках ротори лемніскатної форми, що обкатують один одного в камері, яка виконана у вигляді циліндрів неповного перетину.

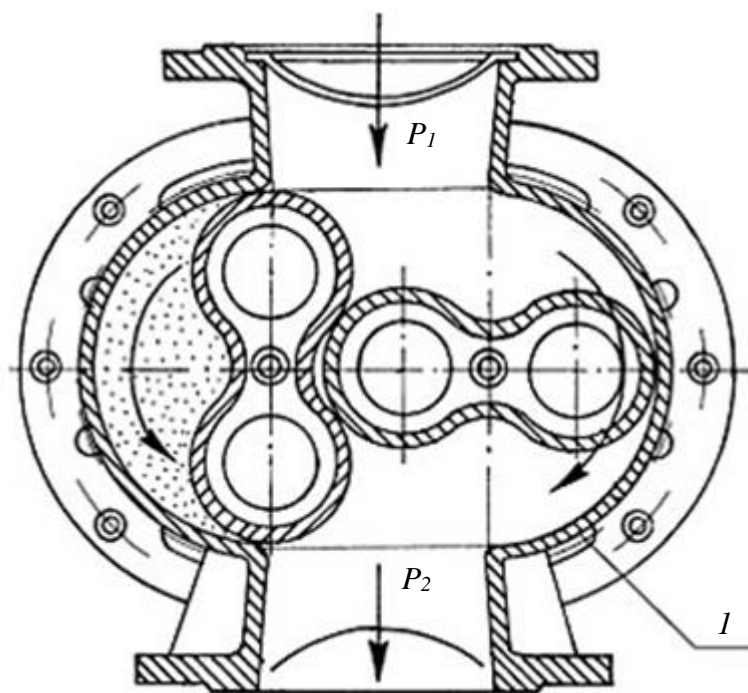


Рисунок 10 – Ротаційний лічильник

Ротори з'єднані з шестеренчастим редуктором, що заповнений мастилом. Проміжок між поверхнями роторів при обертанні складає 0,05...0,1 мм, який викликаний потоком газу, що вимірюється, ротори не стикаються.

Лічильники роторного типу відрізняються широким динамічним діапазоном вимірювання витрати газу до 1 : 200 (співвідношення мінімальної до максимальної витрати).

Переваги: не інерційні, мають високу надійність. Недоліки: вимагають гарного очищення газу (необхідно застосовувати якісні фільтри), бояться гідроудару. Ротаційні лічильники газу в основному застосовуються для вимірювання кількості горючих газів. Похибка вимірювань може складати менше 1% і викликана втратами у проміжках між нерухомими стінками і роторами.

Об'ємний клапанний лічильник.

Об'ємний клапанний лічильник (рис. 11) є лічильником циклічної дії.

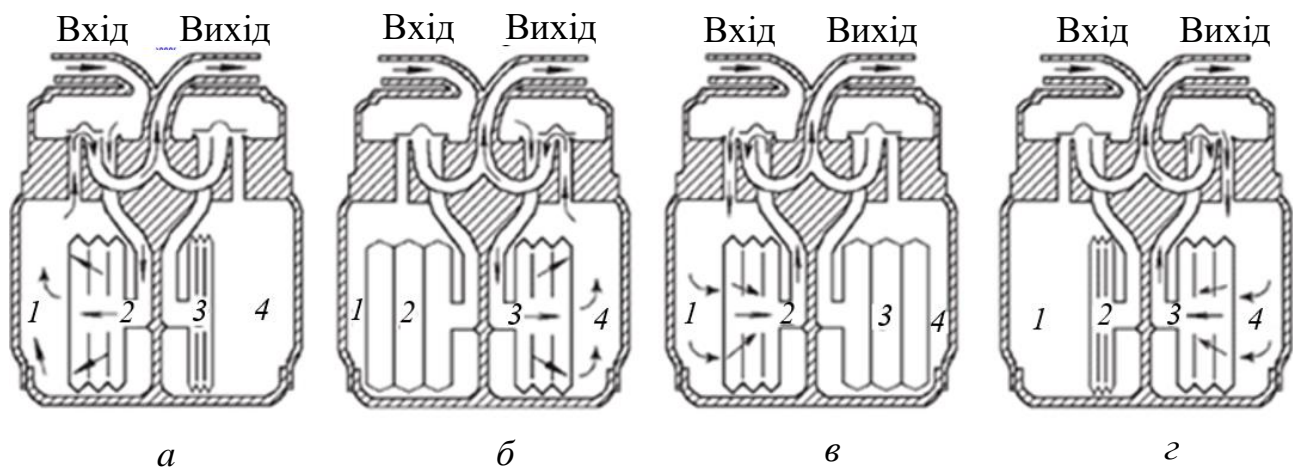


Рисунок 11 – Об'ємний клапанний лічильник

Принцип дії об'ємних лічильників ґрунтується на вимірюванні певного об'єму речовини, який проходить через прилад, і підсумовуванні результатів цього вимірювання. Вони мають мірні камери зі стінками, що переміщуються (1, 2, 3, 4) і які витискують вимірювальний об'єм речовини, звільняючи камеру для наступної порції.

Переваги: низька вартість. Недоліки: максимальний тиск до 1 бар, незручності при монтажі.

3. Хід виконання роботи

Схема стенда з двигуном внутрішнього згоряння наведена на рис. 12.

Вимірювання на стенді слід проводити при різних значеннях частоти обертання колінчастого валу (частота обертання і навантаження задаються викладачем) і заносяться до протоколу випробувань.

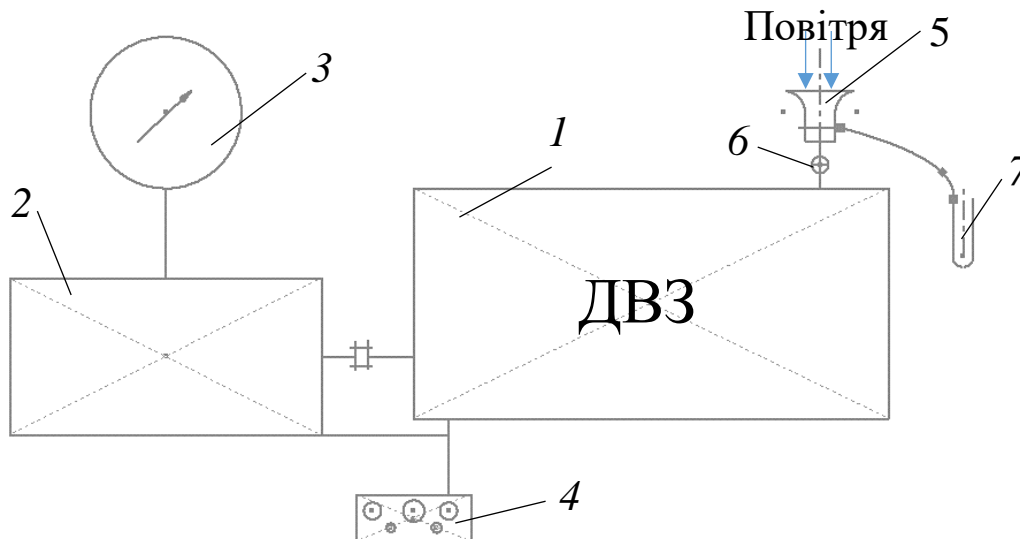


Рисунок 12 – Схема стенда вимірювання витрати повітря:
 1 – двигун; 2 – пристрій навантаження; 3 – ваговий пристрій;
 4 – панель керування; 5 – сопло; 6 – турбінка;
 7 – «U»-подібний манометр

Після виходу двигуна на сталий режим роботи студенти проводять вимірювання таких параметрів:

- частота обертання колінчастого валу, хв^{-1} ;
- навантаження, кг;
- перепад тиску на дросельному пристрої, мм. вод. ст.;
- напруга, що видається турбінним витратоміром, В.

Крім того, під час випробувань записують значення температури і тиску навколишнього повітря.

Проводять обчислення витрати повітря за залежністю для визначення витрати, яка після підставлення відповідних коефіцієнтів, прийме вигляд, кг/год :

$$G = 8,46 \cdot 10^{-3} \cdot d_c^2 \cdot \sqrt{\frac{B_0 \cdot (P_1 - P_2)}{t_0 + 273}}.$$

Знаходять коефіцієнт переведення показників вольтметра у витрату повітря:

$$k = U / G.$$

Таблиця 1 – Протокол вимірювання витрати повітря через двигун

Дата _____

Температура навколишнього повітря $t_0 =$ _____ °C

Тиск $B_0 =$ _____ мм.рт.ст.

Марка двигуна _____

Тип звужуючого пристрою: _____

Діаметр звужуючого пристрою: _____ мм

Режим	Навантаження P_T , кг	Частота обертання КВ n , хв ⁻¹	Температура охолоджуючої рідини t_{OP} , °C	Температура мастила t_M , °C	Тиск мастила p_M , кг/см ²	Перепад тиску на дросельному пристрої, $P_1 - P_2$ мм.вод.ст	Витрата повітря G , кг/год	Коефіцієнт переведення k_i
1								
2								
3								
4								
5								

$$k_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^5 k_i}{5} = \text{_____}.$$

Після визначення витрати повітря слід побудувати графік залежності витрати повітря двигуном від частоти обертання колінчастого валу.

Наприкінці слід записати висновки у відповідності до мети лабораторної роботи.

Лабораторна робота 4

Визначення параметрів потоку газу при дроселюванні

Мета роботи – закріпити теоретичні знання та отримати практичні навички з обробки експериментальних даних і визначення параметрів потоку при дроселюванні.

1. Загальні положення

В лабораторній роботі 3 було визначено значення витрати повітря через двигун (G) за допомогою нормального сопла. При цьому має місце дроселювання газу, а отже, втрата тиску і ексергії. У зв'язку, з цим, для дослідження зміни якості потоку газу при його дроселюванні в лабораторній роботі визначаються:

- параметри повітря до і після витратоміра в процесі випробувань двигуна;
- енергетичний баланс у витратомірному вузлу;
- анергоексергетичний баланс для цього вузла.

Слід мати на увазі, що подібним чином досліджувані явища спостерігатимуться в охолоджувачах наддувного повітря дизелів, де має місце зниження температури потоку газу і втрата його тиску.

Величину потоку повітря краще визначати в кіломолях за секунду, тоді

$$M_g = \frac{G_g}{3600 \cdot m_g}.$$

Оскільки барометричний тиск зазвичай вимірюється в міліметрах ртутного стовпа, а перепад тисків на витратомірному пристрої - в міліметрах водяного стовпа, то, з огляду на, що 1 мм.рт.ст. = 133,322 Па, а 1 мм.вод.ст. = 9806,55 Па отримаємо величини тиску до і після витратоміра в одиницях СИ, Па:

$$p_0 = 133,322 \cdot B_0,$$

$$p_1 = p_0 - 9,807 \cdot \Delta p_c.$$

Якщо знехтувати втратами теплоти від стінок витратоміра в навколишнє середовище, то температура повітря на вході в витратомір буде чисельно дорівнювати його температурі після витратоміра:

$$t_0 = t_1.$$

Таким чином, видно, що при використанні розглянутого стенду є можливість визначення параметрів повітря, що надходить до двигуна на необхідних режимах його роботи. При цьому під час випробувань експлуатаційні параметри двигуна контролюються і підтримуються в необхідних межах.

2. Визначення енергетичного балансу витратомірного вузла

Так як раніше було прийнято, що втрати теплоти від стінок витратоміра відсутні, то ентальпія потоку повітря на вході в сопло чисельно дорівнює ентальпії потоку на виході з нього (рис. 13), кВт:

$$H_0 = H_1 = M_b \cdot \mu C_{p_m} \cdot T_0, \quad (1)$$

де μC_{p_m} – середня мольна теплоємність повітря при постійному тиску, кДж/кмоль·К;

T_0 – температура повітря ($T_0 = t_0 + 273$), К.

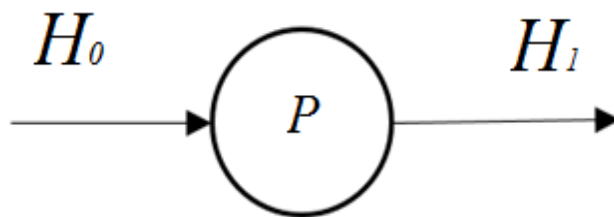


Рисунок 13 – Схема енергетичного балансу витратомірного вузлу

Для отримання якісної оцінки величини ентальпії потоку повітря його теплоємність можна визначити виходячи з лінійної залежності останньої від температури, кДж/(кмоль·К):

$$\mu C_{p_m} = 28,124 + 209,5 \cdot 10^{-5} (t_0 + 273).$$

Таким чином, при проходженні потоку повітря через витратомірний пристрій величина його ентальпії залишається незмінною.

Визначення енергетичного балансу витратомірного вузлу.

При визначенні величин ексергії, анергії і втрат ексергії з метою порівняння отриманих результатів приймемо в якості рівня відліку нормальні фізичні умови, при яких

$$p_{н.у.} = 101325 \text{ Па (760 мм.рт.ст.)},$$

$$t_{н.у.} = 0^{\circ} \text{C (273,15 K)}.$$

Відповідно до теорії анергоексергетична схема витратоміра матиме вигляд, що редставлена на рис. 14, де можна застосувати наступні формули:

$$\begin{aligned} H_0 &= E_0 + A_0; \\ H_1 &= E_1 + A_1; \\ D &= A_1 - A_0 = E_0 - E_1 \end{aligned} \quad (2)$$

Тут E_0 і A_0 є ексергією і анергією потоку повітря на вході в розглянутий термодинамічний вузол, E_1 і A_1 - на виході з нього, а D - втрати ексергії внаслідок дроселювання газу.

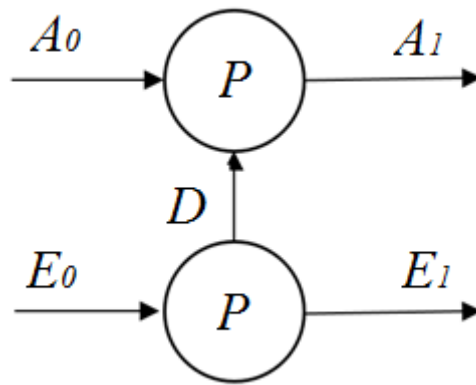


Рисунок 14 – Анергоексергетична схема витратомірного вузла

При цьому значення величин ексергії, кВт, і анергії, кВт,

$$E = M \left[(h - h_{н.у.}) - T_{н.у.} (s - s_{н.у.}) \right];$$

$$A = M \left[h_{н.у.} + T_{н.у.} (s - s_{н.у.}) \right],$$

де

$$h = \mu C_p \cdot T, \text{ кДж/кмоль};$$

$$s - s_{н.у.} = \mu C_p \cdot \ln \frac{T}{T_{н.у.}} - 8,314 \cdot \ln \frac{p}{p_{н.у.}}, \text{ кДж/(кмоль} \cdot K);$$

$$\mu C_p = 28,124 + 419 \cdot 10^{-5} \frac{T + T_{н.у.}}{2}, \text{ кДж/(кмоль} \cdot K).$$

Перевірку отриманих результатів виконують шляхом порівняння ентальпій потоку повітря, що отримано за залежностями (1) і (2).

3. Хід виконання лабораторної роботи

До проведення лабораторної роботи допускаються студенти, які вивчили дані методичні вказівки та мають бланк протоколу випробувань і таблицю результатів їх обробки з лабораторної роботи 3.

1. Вихідні дані з лабораторної роботи №3 (номер режиму вказується викладачем) заносяться до табл. 2.

Таблиця 2 – Дані з протоколу випробувань двигуна (ЛР №3)

$B_0 =$ _____ мм.рт.ст.; $t_0 =$ _____ °C; $d_c =$ _____ мм.

Номер режиму	Величини що вимірюються					
	$n, \text{ хв}^{-1}$	$P_m, \text{ кг}$	$\Delta P_c, \text{ мм.вод.ст.}$	$t_{OP}, ^\circ\text{C}$	$t_m, ^\circ\text{C}$	$p_m, \text{ кг/см}^2$

2. За вихідними даними проводяться розрахунки величин ексергії, енергії і втрат ексергії (табл. 3).

3. Після проведення розрахунків слід зробити висновки про зміну якості потоку газу внаслідок його дроселювання, а також аналітично оцінити величину втрати ексергії в витратомірному пристрої в порівнянні з такими втратами в теплообмінниках наддувного повітря дизелів.

Таблиця 3 – Результати обробки вимірювання параметрів повітря при його проходженні через звужуючий витратомірний пристрій двигуна при $p_{н.у.} = \underline{\hspace{2cm}}$ МПа, $T_{н.у.} = \underline{\hspace{2cm}}$ К.

Номер режиму	Обробка результатів експерименту										Перевірка результатів розрахунку			
	t_0 , °C	t_1 , °C	p_0 , МПа	p_1 , МПа	H_0 , кВт	H_1 , кВт	A_0 , кВт	E_0 , кВт	A_1 , кВт	E_1 , кВт	$D = E_0 - E_1$, кВт	$D = A_1 - A_0$, кВт	$H_0 = A_0 + E_0$, кВт	$H_1 = A_1 + E_1$, кВт

Список літератури

1. Колієнко А.Г. Навчальний посібник із дисципліни “Термодинаміка” для студентів інженерних спеціальностей “Теплогазопостачання і вентиляція”, “Обладнання нафтових і газових промислів”, “Видобування нафти і газу”, “Водопостачання та водовідведення”, “Підйомно-транспортні, будівельні, дорожні, меліоративні машини та обладнання” / А.Г. Колієнко. – Полтава : ПолтНТУ, 2005. – 125 с.

2. Дяченко В.Г. Основи теплотехніки і теплові машини : навч. посібник / В.Г. Дяченко. – Харків: НТУ «ХПІ», 2002. – 135 с.

Додаток

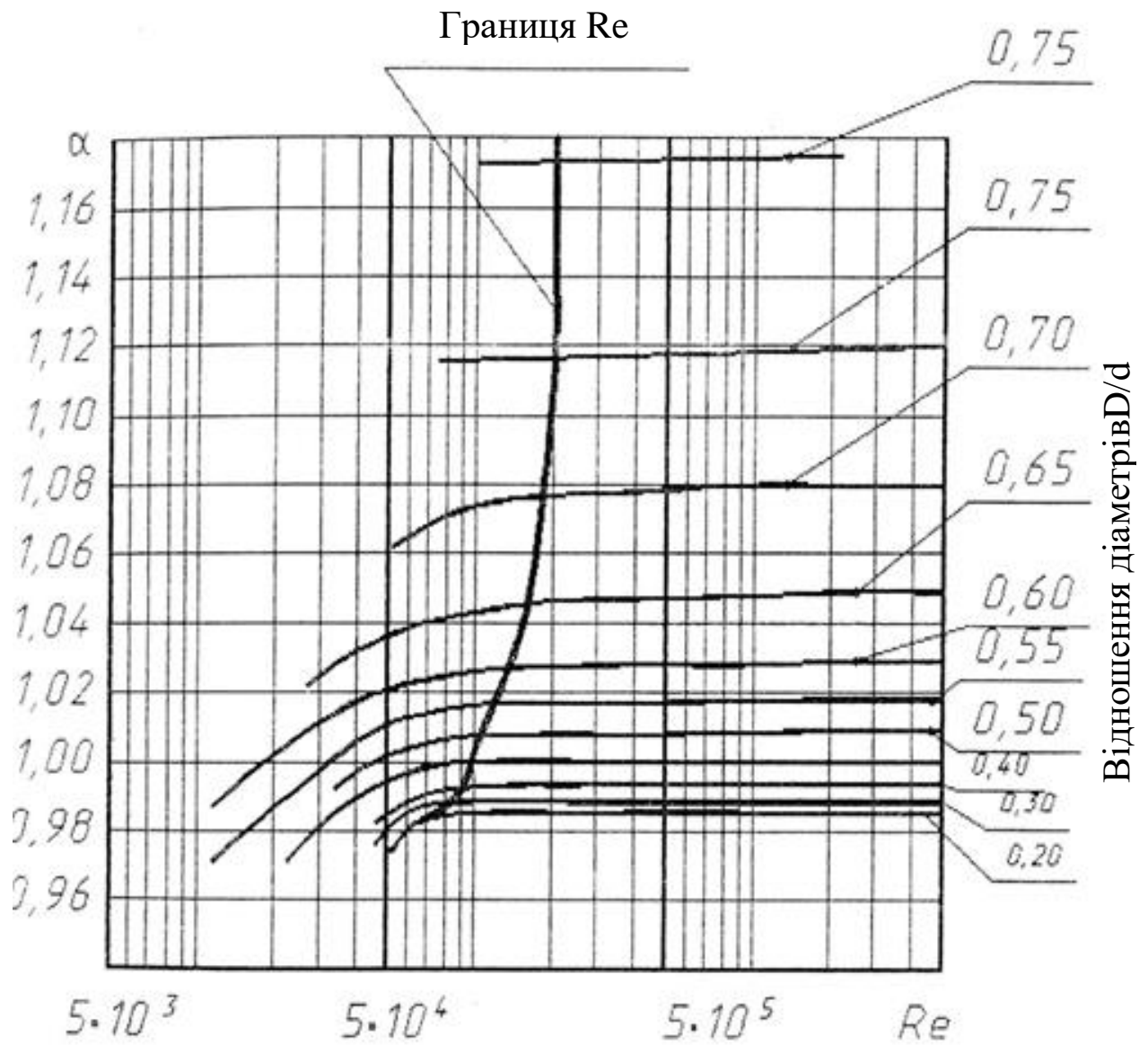


Рисунок Д.1 – Коефіцієнт витрати для нормальних сопел в залежності від числа

Re

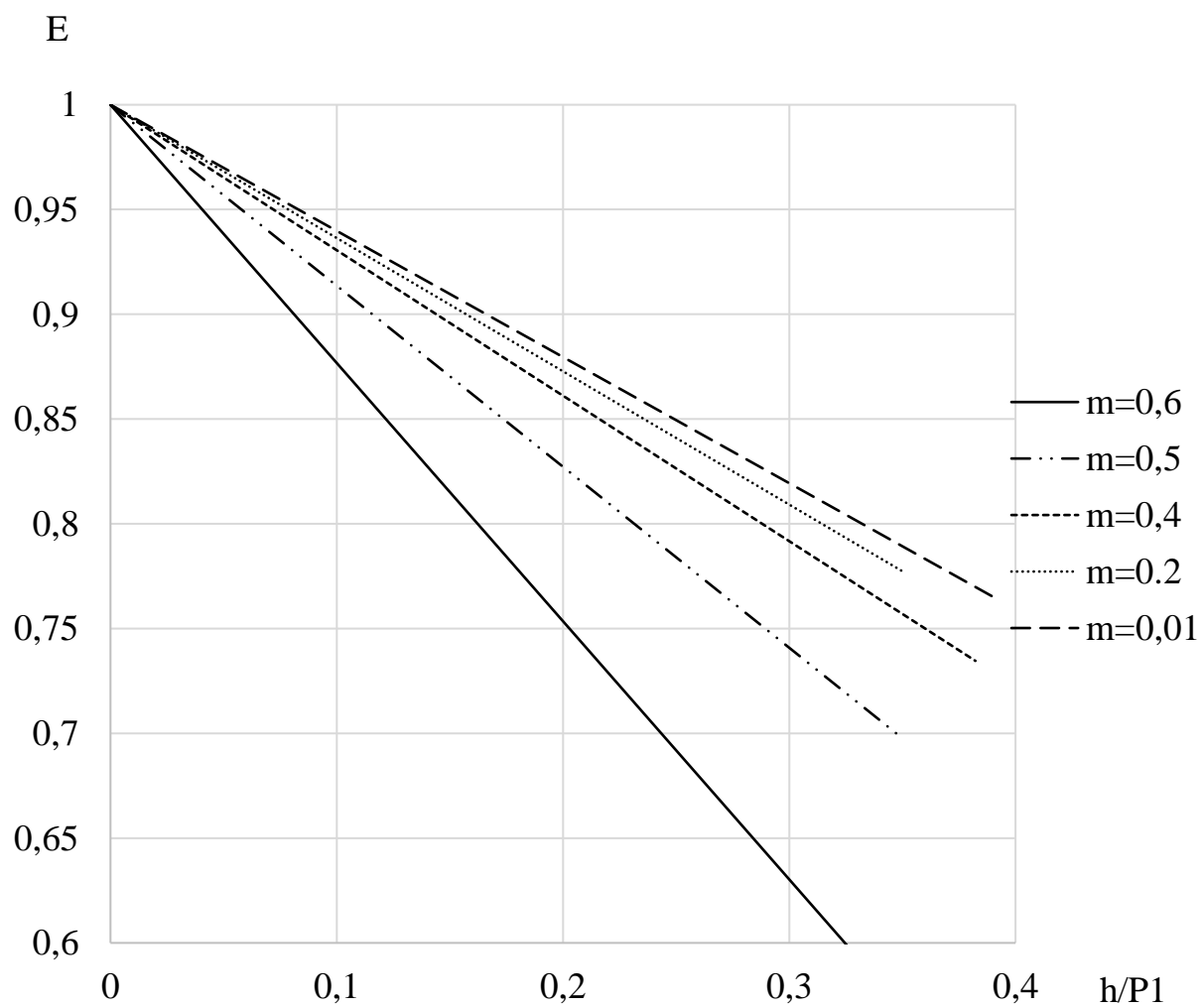


Рисунок Д.2 — Коефіцієнт розширення струй повітря та двохатомних газів для нормальних сопел

ЗМІСТ

ВСТУП	3
Лабораторна робота 3. Вимірювання витрати газу	4
Лабораторна робота 4. Визначення параметрів потоку газу при дроселюванні	18
Список літератури	23
Додаток.....	24

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт
з дисципліни «Термодинаміка теплових двигунів»
(Частина 2)

для студентів спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування»

Укладачі: ЛІНЬКОВ Олег Юрійович
КРАВЧЕНКО Сергій Сергійович

Відповідальний за випуск проф. Пильов В.О.
До видання роботу рекомендував проф. Шелковой О.М.

Редактор О.І. Шпільова

План 2019 р., поз. 166.

Формат 60x84 1/16.

Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 2,6.

Видавничий центр НТУ «ХП». 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №5478 від 21.08.2017 р.

Самостійне електронне видання

